

بازیابی داده های طیفی از صحنه های طبیعی با یک دوربین دیجیتال RGB و

فیلتر های رنگی

چکیده :

بسیاری از روش های بازیابی طیفی با استفاده از دوربین های دیجیتال RGB، صافی و یکنواختی منبع نور و طیف های بازتاب را فرض کرده و از مدل های خطی دو بعدی استفاده می کنند. هدف این مطالعه بررسی و تست این موضوع است که آیا یک روش نگاشت مستقیم می تواند به جای یک رویکرد مدل های خطی برای بازیابی تابش های طیفی و بازتاب های صحنه های طبیعی با دوربین های دیجیتال RGB و فیلتر های رنگی استفاده شود. در شبیه سازی های کامپیوتری، یک دوربین دیجیتال RGB با بیش از سه فیلتر رنگی به منظور تصویر برداری از صحنه های حاصل از یک دیتابیس تصویر ابر طیفی استفاده شد. سه شاخص برای ارزیابی بازیابی با روش نگاشت مستقیم استفاده شد: خوبی برازش، خطای جذر میانگین مربعات و یک متریک تفاضل رنگی. نتایج نشان داد که با دو و سه فیلتر، هر دو تابش های طیفی و بازتاب ها را می توان به طور دقیق برای بسیاری از شرایط کاربردی، بازیابی کرد. با افزایش اندک در پیچیدگی طیفی، یک دوربین RGB و تعداد کمی فیلتر رنگی، امکان بازیابی بهتر صحنه های طبیعی نسبت به استفاده ننها از RGB وجود دارد.

کلمات کلیدی : بازتاب، سیستم تصویر برداری چند طیفی، منبع نور، صحنه های طبیعی

مقدمه

هدف تصویر برداری چند طیفی، بازیابی تابش یا طیف های تابشی و انعکاسی در هر پیکسل در یک صفحه مورد نظر است (1-4). معمولاً، یک سیستم چند طیفی متشکل از دوربین های دیجیتال متصل به طیف وسیعی از فیلتر های پهن و باریک باند است. در صورتی که تعداد فیلتر ها به اندازه کافی بزرگ باشند و پهنای باند آن ها به اندازه کافی کوچک باشد، همانند سیستم تصویر برداری ابر طیفی، داد های طیفی را می توان به طور دقیق بازیابی کرد (5-9). با این حال با چند فیلتر پهن باند، بازیابی طیفی منجر به ایجاد یک مسئله ناخوش تعریف می شود. بسیاری از روش های تصویر برداری چند طیفی از یکنواختی و صافی طیف های سیگنال با منابع نور و بازتاب های طیفی استفاده می کنند که با مدل های بعد پایین بر اساس تحلیل مولفه های طیفی (PCA) و یا تحلیل

مولفه های مستقل (ICA) (16-20) نشان داده می شوند. از این روی با توجه به یک مدل خطی (10-21)، در صورتی که تعداد ضرایب ICA یا PCA یک مجموعه خاصی از طیف ها برابر با تعداد پاسخ های دوربین باشد) در ساده ترین مورد تریکوماتیک، سه مورد)، آنگاه طیف ها را می توان با یک تبدیل معکوس مجموعه ای از پاسخ های طیفی بدست آورد و تبدیل پیشرو از مجموعه داده های معرف برآورد شد. در صورتی که تعداد ضرایب بیش از تعداد مقادیر پاسخ باشد، آنگاه ضریب PCA بایستی با تصویر برداری از صحنه تحت منابع نور مختلف و یا با معرفی فیلتر های رنگی برای اصلاح طیف های سنسور افزایش یابد (18-22-23).

به جای اجرای PCA یا ICA اولیه، مجموعه ای از طیف های سیگنال را می توان به طور مستقیم از مجموعه ای از پاسخ های دوربین برآورد کرد. این پاسخ ها را می توان از خود دوربین بدست آورد و برای اهداف فعلی مقاله ، می توان آن ها را از یک مجموعه حساسیت های طیفی محاسبه کرد (بخش حساسیت های طیفی دوربین و فیلتر های رنگی). برای یک دوربین دیجیتال RGB سنتی ، مجموعه ای از پاسخ های دوربین شامل ماتریس سه مقدار برای هر پیکسل در همه پیکسل ها در صحنه است. در صورتی که فیلتر های رنگی معرفی شوند، آنگاه مجموعه ای از پاسخ های دوربین شامل چندین ماتریس (بخش محاسبات) در نظر گرفته می شود. روش نگاشت مستقیم به طور دقیق در بخش بعدی توصیف می شوند.

نگاشت مستقیم پاسخ های دور بین و طیف ها

با توجه به یک مجموعه ای از طیف های آموزشی S (که می تواند تابش های طیفی یا بازتاب های مربوط به هر نمونه خاص از پیکسل ها در صحنه باشد) و مجموعه متناظر از پاسخ های دوربین R ، یک ماتریس تبدیل بازتابی $D = SR^+$ تعریف می شود که در آن R^+ شبه اینورس R می باشد (این عبارت متفاوت از عبارت ارایه شده در منبع 24 است). اگر R دارای رتبه کامل باشد، آنگاه $R^+ = (R^t R)^{-1} R^t$ است که در آن R^t ترانسپوز R است. یک برآورد \hat{S}_1 مجموعه ای از طیف های آزمایشی S_1 بوده و از مجموعه متناظر از پاسخ های دوربین R_1 با استفاده از تبدیل D بدست می آید یعنی $\hat{S}_1 = DR_1$ (منبع 25 و 26). روش نگاشت مستقیم به طور موفق در زمینه تصویر برداری هنری (22-27) و برآورد منبع نور و روشنایی استفاده شده است با این حال این مسئله هنوز مشخص نیست که آیا برای برآورد بازتاب طیفی و انعکاسی در شرایطی که روشنایی غیر قابل

کنترل است، کارآمد و موثر است یا خیر. صحنه های طبیعی، که موضوع این مطالعه است، بیانگر یک چالش مهم برای روش های بازیابی طیفی است.

بازیابی طیف های طبیعی

انتخاب طیف های آموزشی مورد استفاده برای محاسبه تبدیل بازیابی، در تعیین عملکرد آن اهمیت زیادی دارد. در صورتی که مجموعه معرف نباشد، آنگاه تبدیل بازیابی نیز غیر صحیح خواهد بود و اگر بسیار مشابه با مجموعه آزمایشی باشد، عمومیت خود را از دست می دهد. در عمل، مجموعه های آموزشی مختلف برای کاربرد ها و شرایط مختلف استفاده می شود برای مثال رنگ روغن برای تحلیل چند طیفی آثار هنری.

اگرچه یک استاندارد در برخی از شرایط آزمایشگاهی نظیر مجموعه مانسل و مک بث کالر چکر، که شامل طیف های بازتاب در محیط های طبیعی است، می تواند یک سری مجموعه های آزمایشی بهینه را در اختیار بگذارد زیرا آن ها بیانگر و مدل کننده توزیع بازتاب های طیفی طبیعی نمی باشند.

هدف این مطالعه بررسی این است که آیا روش نگاشت مستقیم را می توان به جای رویکرد مدل های خطی برای بازیابی تابش های طیفی و بازتاب ها از صحنه های طبیعی مورد استفاده قرار داد یا خیر. طیف های طبیعی با تصویر برداری ابر طیفی بدست آمده و ماتریس بازیابی با استفاده از پاسخ های طیفی شبیه سازی شده یک دور بین دیجی تال RGB همراه با ترکیبات مختلف فیلتر های رنگی مقایسه می شود.

نتایج نشان داد که طیف های طبیعی به طور صحیح با این سیستم ساده بازیابی شدند و همان طور که انتظار می رفت، صحت به طور معنی داری بهتر بود به خصوص زمانی که بازتاب های طبیعی به عنوان مجموعه آموزشی به جای نمودار رنگی استفاده شد

روش ها

داده های ابر طیفی

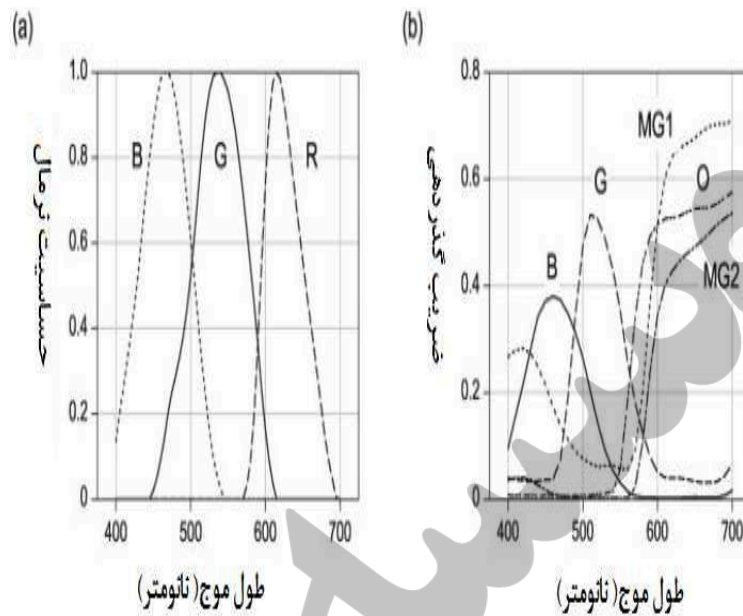
داده های ابر طیفی از سی صحنه طبیعی، پانزده محیط روستایی و پانزده محیط شهری از طریق دیتابیس با تفکیک پذیری (وضوح) مکانی بالا گرفته شدند. صحنه ها از منطقه مینهو در پرتغال گرفته شد که دارای اقلیم معتدله و طیف وسیعی از سازند های سنگی و پوشش گیاهی طبیعی است. سیستم تصویر برداری طیفی از یک دوربین مونو

کروماتیک دیجیتال پلیر با وضوح مکانی پیکسل های 1024×1344 (هامستو، مدل C4742-95-12ER)

(با یک فیلتر کریستال مایع (واری اسپس مدل VS-VIS2-10-HC-35-SQ ، مرکز تحقیقات و ابزار سازی کمبریج) نصب شده در جلوی لنز با فیلتر بلوک مادون قرمز استفاده می کند. برای هر صحنه، 33 تصویر در بازه های 10 نانومتری در 400 تا 720 نانومتر با وضوح شدت 12 بیت در هر پیکسل گرفته شد. این توالی های تصویر خام از نظر نویز، انحراف تصویر، و اتفاضل کروماتیک بزرگ نمایی یا ترجمه تصحیح شد. بازتاب طیفی در هر پیکسل با نرمال سازی سیگنال تصحیح شده در برابر مقادیر بدست آمده از رفرنس طبیعی شامل یک سطح خاکستری صفحه کوچک واقع در صحنه برآورد شد. بازتاب طیفی در مرجع با یک اسپکترو رادیومتر اندازه گیری شد که واسنجی و کالیبراسیون آن توسط آزمایشگاه فیزیک ملی صورت گرفته بود. تابش طیفی بازتاب شده در هر پیکسل با ضرب بازتاب طیفی در بازتاب طیفی برخوردی در مرجع طبیعی برآورد شد (کالری متر طیفی، مدل PR-650، فتو ریسرچ، CA). تجزیه تحلیل فرض اساسی این روش برآورد برای سطوح روشن مستقیم یا غیر مستقیم در پیوست الف از منبع 30 نشان داده شده است. روش به کار برده شده از حیث ماهیت سیگنال مدل سازی شده خنثی بودف به طوری که هر دو طیف های تابشی و بازتابی در نظر گرفته شدند.

حساسیت های طیفی دوربین و فیلتر های رنگی

پاسخ های دوربینی محاسبه شده با استفاده از حساسیت های طیفی دوربین RGB دیجیتال با وضوح مکانی 1024×1280 پیکسل با وضوح شدت 12 بیتی در هر کانال و در هر پیکسل بدست آمد. شکل 1 الف حساسیت های طیفی سنسور های قرمز، سبز و آبی CCD دوربین را نشان می دهد. حساسیت های اوج و پهنای باند سه کانال مشابه با دوربین های RGB تجاری موجود بود. شکل 1 ب، ضریب گذر یا انتقال طیفی پنج فیلتر رنگی را نشان می دهد که در شبیه سازی در جلوی دوربین برای اصلاح پاسخ های دوربین واقع شده است. فیلتر ها نمونه هایی از مواد پلاستیکی اکریک شفاف بودند: دو قرمز (MG1 و MG2)، پرتقال (O)، یکی سبز (G)، و یکی آبی (B).. این انتخاب بر اساس بهینه سازی رایانشی اکتشافی قبلی فیلتر های مختلف با ضریب گذر طیفی و پهنای باند متغیر است.



شکل 1: الف: حساسیت های طیفی نرمال سنسور های دوربین دیجیتال RGB ب: گذر دهی طیفی فیلتر های رنگی مورد استفاده با درو بین ها

محاسبات

مجموعه های مختلف قطعات اسکن برای مجموعه های آموزشی و آزمایشی استفاده شد. مجموعه آموزشی-ماتریس مورد استفاده برای دست آوردن ماتریس بازیابی، از 30 قطعه مختلف تشکیل شد یکی از هر صحنه، هر قطعه اندازه پیکسل 151×151 . سه مجموعه داده اضافی زیر برای تایید صحت روش استفاده شد. مجموعه آموزشی 1 از سه قطعه تصادفی از مجموعه آموزش ماتریس تشکیل شد. مجموعه 2 از 30 قطعه 61×61 پیکسل بدون پیکسل ها در مجموعه آموزشی ماتریس تشکیل شد. و مجموعه آزمایشی 3 با سه قطعه اضافی 151×151 پیگسل از سایر صحنه ها تشکیل شد (نمای کلوزآپ در مجموعه آزمایشی ماتریس استفاده نشده است). اثر هر همبستگی احتمالی بین پیکسل های مجاور با نمونه گیری از نیمی از صحنه ها در پیکسل های عمودی و افقی تست شد و طیف های تابیش بازیابی شده بانواع بدست آمده از صحنه های نمونه برداری نشده مقایسه شدند. دو مجموعه از سیگنال های بازیابی شده (که توزیع آن ها با تست کلوموگروف اسمیرنوف غیر نرمال بودند) تفاوت معنی داری را در همه مجموعه فیلتر ها نشان دادند (ازمون رتبه بندی ویلکوکسون $P < 0.001$). چون بازتاب ها تفاوت معنی داری را در پیکسل های مجاور نشان دادند، معرفی فاصله های بزرگ تر پیکسل، که یکپارچگی مکانی نمونه را از دست داده است، به طور غیر ضروری در نظر گرفته شد.

مجموعه آزمایشی ماتریس شامل $151 \times 151 \times 30$ در هر طیف در 400 تا 700 نانومتری تعریف شد. این طیف ها و طیف های دیگر در بازه های 5 نانومتری مطابق با بازه های نمونه برداری برای حساسیت های طیفی دور بین میان یابی شد (نمونه گیری شده در فاصله های 10 نانومتری)، و این منجر به یک ماتریس S از مقدار 61×684030 شد. پاسخ های دوربین r_i به این طیف ها (123 به ترتیب برای سنسور های قرمز، سبز و آبی است) که به صورت زیر محاسبه شد: در هر پیکسل، فرض کنید که $S(\lambda)$ طیف سیگنال، $R_i(\lambda)$ حساسیت طیفی دوربین برای هر حسگر i و $F(\lambda)$ گذر دهی طیفی یکی از فیلتر های انتخاب شده است که در آن $\lambda = 400, 405, \dots, 700 \text{ nm}$ است. سپس

$$r_i = \sum_{\lambda=400}^{700} S(\lambda)F(\lambda)R_i(\lambda). \quad (1)$$

می باشد.

با کل n فیلتر رنگی، $3n + 3$ پاسخ دوربین برای هر پیکسل (از جمله پاسخ های بدون فیلتر های رنگی)، یک ماتریس r برای کل قطعه تشکیل شد. همان طور که در مقدمه گفته شد، ماتریس بازیابی $D (3n + 3) \times 61$ از شبه اینورس R^+ یا R به صورت زیر محاسبه شد

$$D = SR^+. \quad (2)$$

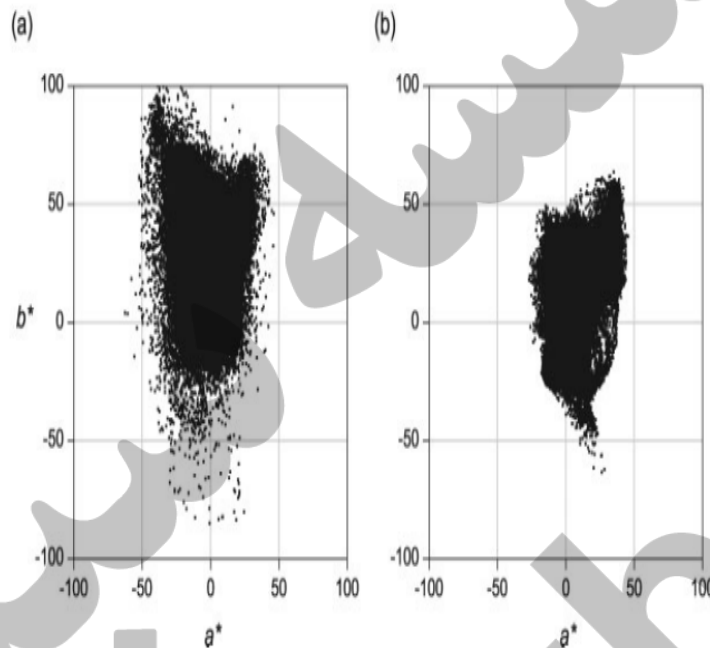
ماتریس D برای دوربین بدون فیلتر رنگی و یک فیلتر (هر یک از 5 فیلتر) با دو فیلتر (چهار ترکیب متفاوت از دو فیلتر رنگی) و با سه فیلتر (دو ترکیب متفاوت)، محاسبه شد. فیلتر های مورد استفاده در ترکیب دو فیلتر از انواع با بهترین عملکرد انتخاب شد. فیلتر های مورد استفاده در ترکیب سه فیلتری از انواع با بهترین عملکرد با بازیابی دو فیلتری انتخاب شدند. چهار ترکیب دو فیلتری و دو ترکیب سه فیلتری تست شدند.

ارزیابی کیفیت طیفی و کالریمتری سیگنال های بازیابی شد

سه شاخص از عملکرد بازیابی برای اجتناب از برخیتکشاخص ها استفاده شد: دو مورد شامل شاخص های طیفی و یک مورد کالریمتری بود. به طوری که حساسیت چشم به تفاوت های رنگی در نظر گرفته شد. اولین مورد، ضریب

خوبی برازش (CFC) بود که به صورت کوسینوس زاویه بین سیگنال بازیابی شده \hat{S} و سیگنال اصلی S تعریف می شود

$$GFC = \frac{\sum_{\lambda=400}^{700} \hat{S}(\lambda)S(\lambda)}{\left(\sum_{\lambda=400}^{700} \hat{S}(\lambda)^2\right)^{1/2} \left(\sum_{\lambda=400}^{700} S(\lambda)^2\right)^{1/2}} \quad (3)$$



شکل 2: نمودار CIE LAB مجموعه آموزش ماتریس ابرای الف: داده های واقعی و ب: داده های شهری

مزیت رایج ترین شاخص تشابه طیفی، این است که تحت تاثیر فاکتور های مقیاس قرار نمی گیرد. مقادیر متغیر از 0 تا 100 درصد می باشد و $GFC \geq 99.5\%$ با بازیابی قابل قبول و $GFC \geq 99.99\%$ با یک برازش تقریباً دقیق متناظر است. دومین شاخص، خطی جذر میانگین RMSE می باشد که برای تابیش ها، مقیاس بندی شد که ماکزیمم مقدار در دامنه طول موج بود. سومین مورد تفاضل رنگی CIE LAB ΔE_{ab}^* بود که با استناد به سیگنال رنگ یک لکه سفید در صحنه برای برآورد نور محاسبه شد. برای بازتاب ها، یک منبع نور با انرژی یکسان فرض شد. منابع نور استاندارد و واقعی استفاده نشد زیرا هدف اصلی مقایسه ترکیبات مختلف فیلتر بود. این منبع نور با انرژی یکسان با نور صحنه ثبت شده در زمان کسب تصویر ترکیب شود (بخش داده های طیفی). این سه شاخص برای بازیابی طیفی مجموعه های آزمایشی 1، 2 و 3 استفاده شد.

نتایج و تفاسیر

از روش نگاشت مستقیم، دو براورد مربوط به ماتریس بازتابی D بدست آمد. اولین مورد به پاسخ های دوربین به تابش های طیفی و پاسخ های دوربین به بازتاب های طیفی بود. بر اساس تعریف، تابش های طیفی در یگ پیکسل مطابق با محصول بازتاب طیفی و توزیع توان طیفی منبع نور بود. براورد های بازتاب و تابش طیفی به طور مجزا در زیر بخش های زیر در نظر گرفته شدند (به ترتیب به بخش های بازتابی طیفی و بازتابی انعکاس طیفی مراجعه کنید)

هم چنین بازتابی بستگی به مجموعه داده های آموزشی ماتریس دارد. اگرچه در فضای CIELAB، داده های آموزشی ماتریس شهری و روستایی دارای بازه های روشنایی مشابه بود و توزیع حساسیت آن ها نیز متفاوت بود زیرا نمودار های b^* در برابر a^* در شکل 2 نشان داده شده اند. تفاوت بین دو مجموعه از داده ها در بخش تفاوت های بین صحنه های شهری و روستایی در نظر گرفته شده اند

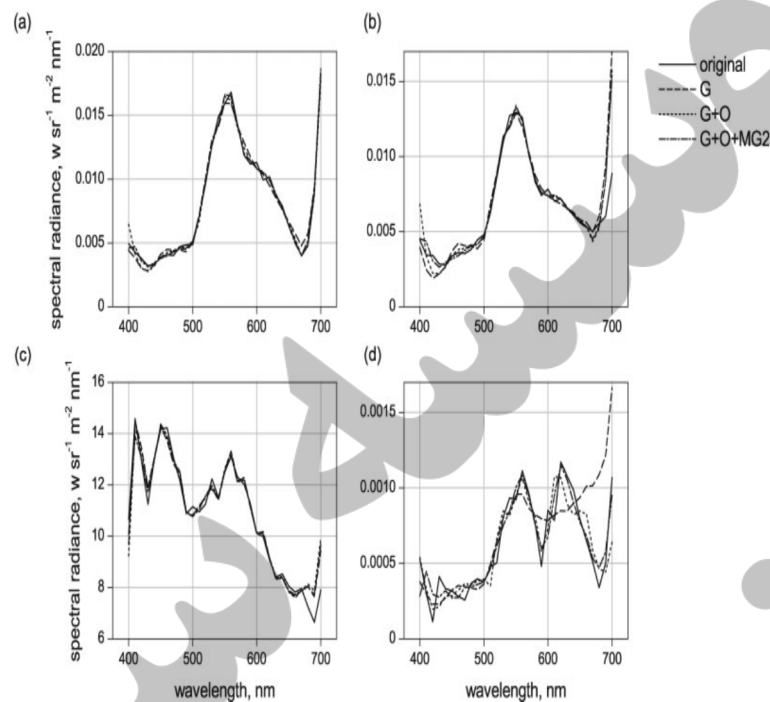
بازتابی بازتاب طیفی

شکل 3 چهار نمونه از بازتابی بازتاب طیفی برای قطعات مختلف صحنه را نشان می دهد. مثال های مربوط به ردیف فوقانی الف و ب از مجموعه آزمایشی 1 و ردیف پایینی ب و ت، در مجموعه آزمایشی 1 نشان داده شده اند. در قسمت چپ، الف و پ، مقادیر CFC و RMSE در صدک پنجم و در سمت راست ب و ت، در صدک انتهای است. تفاوت بین مقیاس های بازتاب ناشی از تابش های بازتابی شده از مناطق روشن شده توسط نور خورشید و مناطق سایه دار است. بازتابی مستقل از مقیاس سیگنال می باشد و این مسئله به دلیل ویژگی خطی پاسخ های دوربین و روش نگاشت مستقیم است.

بازتابی با افزایش تعداد فیلتر های دوربین بهبود می یابد. ترکیب فیلتر نشان داده شده با فیلتر های دارای بهترین نتایج مقایسه شده اند و این در حالی است که ترکیب دو فیلتر هنوز بهتر از یک فیلتر بود و ترکیب سه فیلتر بهتر از ترکیب دو فیلتر بود. با این حال معرفی فیلتر های رنگی بیشتر با افزایش در زمان تصویر برداری، بعید است که منجر به بهبود معنی داری شود.

جدول 1 میانگین (و مشتق استاندارد نمونه) RMSE، GFC و ΔE_{ab}^* محاسبه شده را در همه طیف ها نشان می دهد. تنها بهترین مجموع فیلتر برای ترکیبات سه و دو فیلتری را نشان می دهد. مقادیر RMSE برای ترکیبات

دو سه و فیلتری، پایین هستند. تفاوت های رنگی ΔE_{ab}^* فراتر از واحدنیست و این نشان می دهد که تفاوت های کالری متری قابل توجه بین سیگنال های اصلی و بازیابی شده وجود دارد.



اثرات تعداد فیلتر ها و نوع فیلتر توسط ANOVA دو طرفه فریدمن غیر پارامتری در سه شاخص تایید شد و نتایج آن از نظر آماری معنی دار بود. این آزمون های آماری نشان می دهد که تفاوت ها در بازیابی با یک، دو و سه فیلتر معنی دار بود و این که بازیابی با ترکیبات دو و سه فیلتر معنی دار تر از سایر ترکیبات احتمالی بود.

بازیابی برای مجموعه آموزشی 1 بهتر از مجموعه های آموزشی 2 و 3 بود. این غیر منتظره بود زیرا برآورد ماتریس بازیابی بر اساس مجموعه آزمایشی 1 بود. شکل 2 تصاویر یک قطعه از طیف های بازتاب الف و بازیابی آن ب را با سه فیلتر رنگی نشان می دهد. ترسیم نمودار بر اساس مقادیر پاسخ طیفی محاسبه شده بود. تفاوت های کالری متری بین تصاویر اصلی و بازیابی شده قابل شناسایی نبود و این با مقادیر ΔE_{ab}^* نشان داده شد که کم تر از یک بود.

جدول 1: کیفیت بازیابی تابش های طیفی از صحنه های طبیعی

		فیلترهای رنگی								
شاخص		مجموعه آزمایشی	None	MG1	MG2	B	G	O	G+O	G+O+MG2
GFC (%)	1		99.20 (0.76)	99.64 (0.57)	99.67 (0.56)	99.55 (0.43)	99.50 (0.57)	99.62 (0.41)	99.71 (0.34)	99.86 (0.12)
	2		97.06 (7.14)	98.34 (4.88)	98.46 (4.52)	98.54 (3.46)	98.08 (5.05)	98.46 (3.54)	99.01 (2.39)	99.34 (1.58)
	3		97.05 (5.61)	98.64 (3.44)	98.69 (2.92)	98.53 (3.06)	98.61 (3.26)	98.61 (2.24)	98.96 (1.80)	99.26 (1.40)
RMSE (%)	1		8.28 (2.46)	5.12 (2.09)	4.83 (2.11)	5.99 (1.92)	6.42 (1.84)	5.53 (1.48)	4.72 (1.82)	3.32 (1.15)
	2		9.96 (3.96)	6.65 (3.48)	6.44 (3.29)	6.82 (3.14)	7.37 (3.67)	7.02 (3.15)	5.65 (3.04)	4.55 (2.83)
	3		9.31 (3.35)	6.34 (2.50)	6.17 (2.50)	6.73 (2.54)	6.37 (2.54)	6.21 (2.82)	6.14 (2.24)	5.00 (2.17)
ΔE_{ab}^*	1		0.32 (0.16)	0.09 (0.05)	0.10 (0.06)	0.22 (0.13)	0.06 (0.04)	0.18 (0.12)	0.09 (0.06)	0.05 (0.04)
	2		0.63 (0.61)	0.24 (0.28)	0.28 (0.32)	0.35 (0.32)	0.17 (0.20)	0.35 (0.46)	0.12 (0.14)	0.09 (0.12)
	3		1.01 (0.76)	0.28 (0.18)	0.36 (0.26)	0.24 (0.12)	0.15 (0.09)	0.43 (0.32)	0.08 (0.06)	0.08 (0.06)



(a)



(b)

شکل 4: تصویر الف: قطعه صحنه اصلی و ب: قطعه پوشش دهی شده با سه فیلتر رنگی

بازیابی بازتاب طیفی

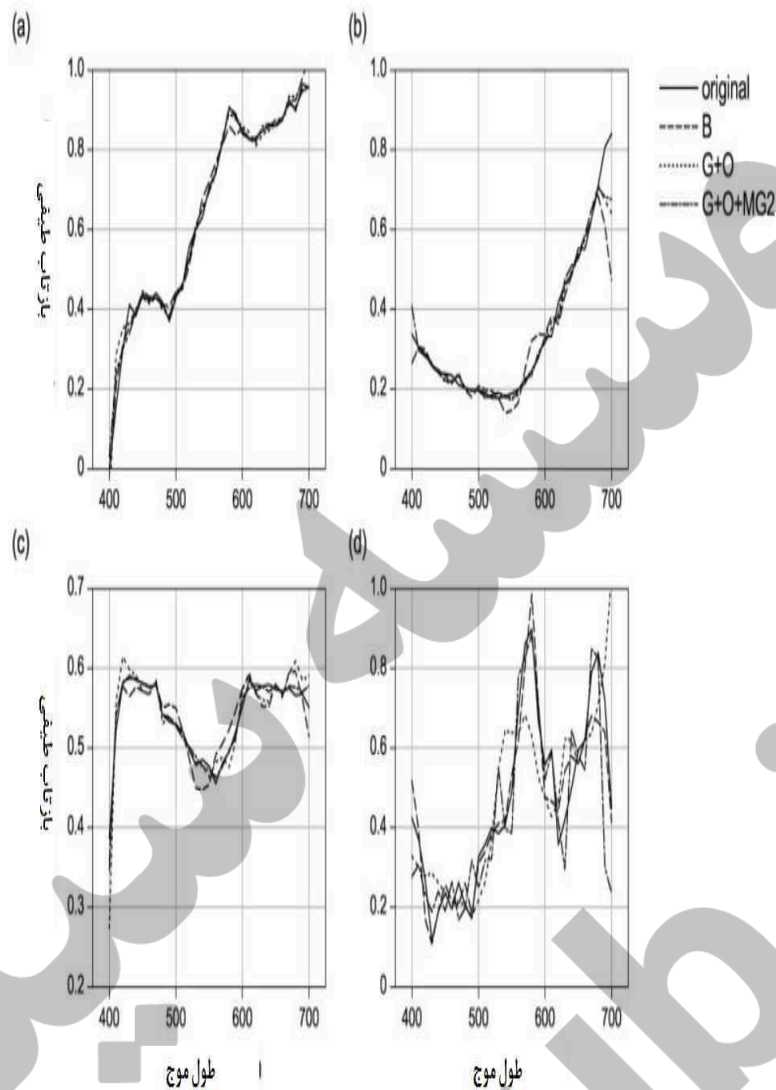
شکل 5 چهار نمونه از بازیابی بازتاب طیفی را برای قطعات مختلف صحنه نشان می دهد. نمونه های مربوط به ردیف بالا الف و ب، از مجموعه آزمایشی 1 و بر روی ردیف پایینی پ و ت از مجموعه آزمایشی 2 می باشند. نمونه های مربوط به سمت چپ الف و پ، دارای مقادیر GFC و RMSE در پنجمین صدک و موارد مربوط به سمت راست الف و ب، در پنجمین صدک پایین است.

جدول 2 میانگین (انحراف معیار نمونه) از GFC، RMSE و ΔE_{ab}^* محاسبه شده را در همه طیف ها نشان می دهد. تنها بهترین ترکیب فیلتر برای مجموعه دو و سه فیلتر نشان داده شده است. همانند تحلیل بازیابی تابش

طیفی، اثرات قوی تعداد فیلتر و نوع فیلتر با ANOVA دو سویه فریدمن غیر پارامتری تایید شد و نتایج آن کاملاً معنی دار بود.

این سطح عملکرد با عملکرد موجود در مطالعات دیگر با استفاده از روش نگاشت مستقیم و یا سایر روش ها برای بازیابی داده های طیفی از رنگ و استاندارد های تصویری تحت نور کنترل شده متناسب است تفاوت های بین صحنه های روستایی و شهری

در تحلیل فوق، طیف های صحنه های روستایی و شهری تفکیک نشده اند. با این حال، چون دو نوع طیف دارای منشا فیزیکی و ویژگی های متفاوتی هستند (شکل 2)، احتمال دارد که اثر بخشی بازیابی نیز متفاوت باشد. بر همین اساس، ماتریس های بازیابی برای هر دو طیف های بازتاب و تابش پس از تفکیک صحنه های روستای و شهری از مجموعه های 1 و 2 برآورد شدند. مجموعه آزمایشی 3 به عنوان تست مرجع برای هر دو ماتریس استفاده شد به طور یکه د و ماتریس بازیابی برای یک مجموعه از طیف ها مقایسه شد. برای مجموعه آزمایشی 1، بازیابی بازتاب ها در مناطق روستایی بهتر از مناطق شهری بود. (بازیابی روستایی با فیلتر G یک میانگین 99.64 GFC درصد، 5.35 RMSE و ΔE_{ab}^* برابر با 0.04، بود در حالی که بازیابی شهری با فیلتر منجر به 99.66 GFC درصد، 6.18 RMSE و ΔE_{ab}^* برابر با 0.08 بود). برای مجموعه آزمایشی 2، بازیابی تابش ها برای صحنه های با ماتریس بازیابی شهری بهتر از صحنه های روستایی با ماتریس بازیابی روستایی بود (برای مثال، بازیابی شهری با فیلتر G، یک 99.37 GFC درصد، 6.82 RMSE و ΔE_{ab}^* برابر با 0.15 نشان داد، در حالی که بازیابی روستایی با فیلتر یکسان دارای 96.67 GFC درصد، 8.22 RMSE و ΔE_{ab}^* برابر با 0.21 بود). آزمون های رتبه ای ویلکوگسون نشان داد که بازیابی تابش ها برای صحنه های روستایی با ماتریس بازیابی روستایی به طور معنی داری با ماتریس بازیابی صحنه های تمایز نیافته بهتر بود.



شکل 5: بازیابی بازتاب های طیفی برای دو عضو الف و ب از مجموعه آزمایشی 1 و برای دو عضو پ و ت از مجموعه آزمایشی 2 با الف و پ دارای GFC در صدک بالایی و ت و ت در صدک پنجم پایینی. مقادیر GFC برای فیلتر رنگی B به ترتیب (a) 99.93%, (b) 98.41%, (c) 99.93%, and (d) 93.80% است.

جدول 2: کیفیت بازیابی بازتاب های طیفی از صحنه های طبیعی

مجموعه آزمایشی شاخص		فیلترهای رنگی							
		None	MG1	MG2	B	G	O	G+O	G+O+MG2
GFC (%)	1	99.07 (1.65)	99.45 (1.09)	99.49 (1.07)	99.63 (0.70)	99.35 (1.17)	99.59 (0.69)	99.75 (0.42)	99.90 (0.10)
	2	96.45 (8.18)	98.00 (4.62)	98.13 (4.28)	98.63 (2.96)	97.64 (5.44)	98.39 (3.17)	98.99 (2.58)	99.31 (1.79)
	3	96.26 (6.30)	97.18 (3.87)	97.30 (3.75)	98.02 (3.32)	96.86 (4.21)	97.64 (3.40)	98.68 (2.40)	98.96 (1.97)
RMSE (%)	1	7.24 (5.27)	5.49 (4.15)	5.20 (4.12)	4.51 (3.45)	6.03 (4.27)	4.88 (3.28)	3.75 (2.77)	2.47 (1.32)
	2	5.54 (6.11)	3.59 (3.65)	3.47 (3.57)	3.17 (3.34)	3.96 (3.96)	3.41 (3.38)	2.68 (2.88)	2.02 (2.04)
	3	2.23 (1.40)	2.25 (1.25)	2.18 (1.23)	1.63 (1.13)	2.46 (1.35)	1.99 (1.13)	1.40 (0.92)	1.25 (0.80)
ΔE_{ab}^*	1	1.03 (0.66)	0.53 (0.42)	0.54 (0.45)	0.50 (0.27)	0.43 (0.39)	0.57 (0.44)	0.24 (0.16)	0.18 (0.14)
	2	1.15 (0.94)	0.68 (0.84)	0.73 (0.82)	0.61 (0.55)	0.53 (0.79)	0.73 (0.85)	0.25 (0.33)	0.22 (0.32)
	3	1.84 (1.25)	1.07 (0.74)	1.18 (0.82)	0.60 (0.55)	0.84 (0.63)	1.26 (0.96)	0.31 (0.33)	0.27 (0.31)

وقتی که ماتریس های بازیابی شهر یو روستایی به یک مجموعه از تابیش ها از مجموعه آزمایشی 3 اعمال شد، بازیابی با ماتریس بازیابی روستایی بهتر بود (برای مثال بازیابی روستایی با فیلتر G منجر به 98.70 GFC درصد، 5.97 RMSE درصد و ΔE_{ab}^* 0.12 بود، در حالی که بازیابی شهری با فیلتر یکسان منجر به میانگین 97.44، 9.72 RMSE درصد و ΔE_{ab}^* 0.41 بود). این منطقی بود زیرا سه صحنه نمای نزدیک به صورت روستایی تعریف شد. به علاوه، نتایج با ماتریس بازیابی به مجموعه آزمایشی 3 بدتر از ماتریس بازیابی روستایی بود ولی در ماتریس بازیابی بهتر بود (ازمون رتبه ای ویلکوگوسون $P < 0.001$)

در رابطه با بهترین ترکیب فیلتر، تفاوت های مشابهی برای صحنه های روستایی و شهری با یک فیلتر وجود داشت ولی روند مشابه با ترکیب دو و سه فیلتر دیده شد. نتایج مشابه برای بازیابی بازتاب ها بدست آمد

عملکرد با Macbeth ColorChecker

برای مقایسه، روش نگاشت مستقیم نیز به مجموعه استاندارد از بازتاب ها یعنی نمودار Macbeth ColorChecker (گرتگ مک بٹ) استفاده شد که به فراوانی در بازیابی طیفی و شناسایی دوربین استفاده می شود. پنج مجموعه متفاوت از 20 بازتاب از مجموعه آزمایشی 1 به طور تصادفی انتخاب شده و عملکرد ماتریس بازیابی برای این مجموعه با مجموعه بازتاب های کالر چکر مقایسه شد. در صورتی که مجموعه ColorChecker معرف بازتاب های طبیعی باشد، تفاوت اندکی در عملکرد با دو ماتریس بود.

جدول 3 انحراف معیار و میانگین شاخص های کیفیت را برای دو ماتریس بازیابی با چهار ترکیب متفاوت نشان می دهد. ماتریس بازیابی بازتاب طبیعی عملکرد بهتری از ماتریس بازیابی داشت. و تفاوت ها از نظر آماری بر طبق ازمون رتبه ای ویلکوگوسون متغیر بود.

یک مقایسه اضافی با 558 بازتاب تصادفی از مجموعه آزمایشی 2 انجام شد. الگوی عملکرد برای همه ترکیبات فیلتر حفظ شد (برای مثال با فیلتر B، ماتریس بازیابی ColorChecker منجر به مقدار میانگین 9640 GFC شد و یک مقدار میانگین 4.82 RMSE درصد بود و مقدار ΔE_{ab}^* از 2.07 بدست آمد و از این روی ماتریس بازیابی بازتاب طبیعی منجر به 98.69 با GFC درصد شد و RMSE میانگین 3.15 و مقدار ΔE_{ab}^* برابر با 1.02 بود. این تفاوت ها بین بازیابی دو مجموعه طیف های آموزشیناشی از این باشد که نمودار مک بٹ کالر چکر، دارای بازتاب های طیفی کم تری در منطقه با طیف های طبیعی بود.

جدول 3: کیفیت بازیابی بازتاب های طیفی با ماتریس های بازیابی بر اساس طیف های طبیعی و طیف های

نمودار مک بث کالر چکر

ماتریس بازیابی	شاخص	فیلتر رنگی			
		None	B	B + O	B + G + MG1
بازتاب طبیعی	GFC (%)	99.22 (6.62)	99.74 (0.33)	99.86 (0.18)	99.91 (0.13)
	RMSE (%)	6.10 (4.79)	4.45 (3.80)	2.79 (1.68)	2.13 (1.23)
	ΔE_{ab}^*	1.47 (0.90)	0.75 (0.69)	0.24 (0.19)	0.09 (0.07)
Macbeth ColorChecker	GFC (%)	98.74 (1.90)	98.88 (1.55)	99.16 (6.16)	99.39 (0.80)
	RMSE (%)	7.96 (5.27)	7.21 (5.44)	6.16 (5.24)	5.24 (3.90)
	ΔE_{ab}^*	1.61 (0.92)	1.46 (0.96)	0.62 (0.78)	0.20 (0.17)

نتیجه گیری :

صحنه های طبیعی با تغییرات پیچیده در ساختار مکانی و روشنایی کنترل نشده منجر به ایجاد مشکلات خاصی برای طیف های بازتاب و انعکاس می کنند. با این حال این مطالعه نشان داده است که یک ترکیب از روش نگاشت مستقیم و دوربین دیجیتال RGB سنتی با تعداد محدودی از فیلتر های رنگی می توانند برآورد های دقیق و قابل قبول را در مورد طیف های نوری در صحنه های طبیعی ارائه کنند

از ترکیبات متفاوت فیلتر های رنگی، بهترین عملکرد با سه فیلتر بدست آمد. از حیث سه شاخص، سیگنال بازیابی شده دارای ضریب خوبی برآزش بهتری از 99 درصد بود که یک خطای میانگین مربعات کم تر از 5 درصد و تفاضل رنگی CIELAB کم تر از 0.27 بود.

استفاده از یک دوربین دیجیتال RGB سنتی در ترکیب با تعداد محدودی از فیلتر های رنگی، منجر به یک رویکرد اقتصادی تر و مقتصد از نظر زمانی برای پوشش چند طیفی صحنه های مصنوعی و طبیعی نسبت به روش های سنتی می شود و روش نگاشت مستقیم، یک عملکرد قابل قبول را بدون نیاز به بهینه سازی پیچیده و پرهزینه برای کاهش خطا در اختیار می گذارد. این رویکرد امکان نمونه برداری از طیف وسیعی از طیف ها را در ساختار ماتریس بازیابی با مجموعه های بازتاب محدود تر نظیر نمودار مک بث می دهد. در عین حال گروه بندی داده ها نیز می تواند مفید باشد. اگرچه بازیابی خوب با مجموعه های آموزشی تمایز نیافته از صحنه های طبیعی و شهری وجود دارد، بازیابی برای صحنه های روستایی با صحنه فقط روستایی به عنوان مجموعه آموزشی و برای صحنه

های شهری تنها با صحنه های شهری به عنوان مجموعه آموزشی، بهتر بود. این مطالعه بیشتر یک تحقیق و حساباتی بوده و پاسخ ها برای یک دوربین دیجیتال RGB خاص و مجموعه ای از فیلتر های رنگی محاسبه شد با این حال کاربرد آن به سایر دوربین ها و فیلتر ها پس از عملیات پیش پردازش نظیر حذف نویز و تصحیح ناهمگنی و ویژگی غیر خطی پاسخ، ساده است.